

基于科研模式综合能力培养的物理创新实验设计及实践

韩广兵¹ 刘培权² 于淑云¹ 刘建强¹ 孙尚倩¹ 徐建强¹

(¹ 山东大学物理学院, 山东 济南 250100; ² 山东正元建设工程有限责任公司, 山东 济南 250024)

摘 要 基于“两性一度”的要求,以创新实践能力培养为目的,设计一个综合实验项目,采用电弧熔炼法制备 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 基合金钢锭,机械破碎后用表面活性剂辅助高能球磨(SABM)方法制备纳米粉(薄片),利用 X-射线衍射仪、扫描电子显微镜、振动样品磁强计等分析手段对所制备的材料进行表征。通过对实验项目内容的“高阶性”和“创新性”设计,提高学生的学习兴趣,提升学生的基本实验技能,培养学生的创新思维能力和科研素养。

关键词 综合能力;创新实验;磁性能;钕钴磁体

PHYSICS INNOVATION EXPERIMENT DESIGN AND PRACTICE BASED ON COMPREHENSIVE ABILITY CULTIVATION OF SCIENTIFIC RESEARCH MODE

HAN Guangbing¹ LIU Peiquan² YU Shuyun¹ LIU Jianqiang¹ SUN Shangqian¹ XU Jianqiang¹

(¹ School of Physics, Shandong University, Jinan, Shandong 250100;

² Shandong Zhengyuan Construction Engineering Co., Ltd, Jinan, Shandong 250024)

Abstract Based on the requirements of the target of golden course, a comprehensive experimental project was designed for the purpose of cultivating innovative practical ability. $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ based alloy ingots were prepared by arc melting, nanometer powders (flakes) were prepared by surfactant assisted high-energy ball milling (SABM) after mechanical crushing, and the prepared materials were characterized by X-ray diffractometer, scanning electron microscope, vibrating sample magnetometer and other analytical means. By designing experimental projects with “advanced” and “innovative” content, students’ interest in learning is enhanced, their basic experimental skills are improved, and their innovative thinking and scientific research literacy are cultivated.

Key words comprehensive ability; innovation experiment; magnetic properties; SmCo magnets

当前,过度侧重理论教学导致学生实践与创新教学至关重要,其作为衔接专业理论知识学习新能力显著弱化。因此,强调创新能力培养的实践与实践创新的关键环节,能够实现二者的相互验

收稿日期: 2025-08-28

基金项目: 山东省教改项目(Z2024030); 教育部产学研合作协同育人项目(231000532084716, 230802557121954); 山东大学教改项目(2024Z24); 2025 年教育部高等学校物理课程教学指导委员会大中物理教育衔接委员会教学研究课题(WX202536)。

通信作者: 韩广兵, hangb@sdu.edu.cn。

引文格式: 韩广兵, 刘培权, 于淑云, 等. 基于科研模式综合能力培养的物理创新实验设计及实践[J]. 物理与工程, 2025, 35(6): 165-169.

Cite this article: HAN G B, LIU P Q, YU S Y, et al. Physics innovation experiment design and practice based on comprehensive ability cultivation of scientific research mode[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(6): 165-169. (in Chinese)

证与促进。已有研究探索了创新性实验教学的实践路径,例如基于原子力显微镜的大学物理实验教学^[1]、面向微波吸收材料性能的综合实验设计^[2]等。将前沿科研成果转化为实验教学资源,不仅能有效提升学生的科研素养和实践创新能力,也有力推动了高水平实验教学项目的建设与发展^[3]。

基于前期的相关科研工作^[4,5],设计了用表面活性剂辅助高能球磨制备 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 基磁粉并探究其磁性能的本科创新实验,用于大学三年级新工科应用物理专业学生创新实验课程的实验项目。通过“材料制备-结构表征-性能测试-机理分析”等一系列实践过程,不仅可以提高学生对专业理论知识的学习、理解和巩固,而且还可以初步培养学生的创新实验思维、动手能力、知识应用和科研能力,增加实验课程的“高阶性、创新性、挑战度”。

1 实验教学设计方案

本实验教学主要包括实验准备、实验实施、实验表征及分析 3 个模块。实验准备是让学生了解 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 基磁性粉末材料的基本晶体结构、性能和用途,熟悉其制备工艺和方法、以及其成分配方;实验实施主要是通过对原材料的电弧熔炼、以及表面活性剂辅助高能球磨制备 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 基磁粉,体现实验的高阶性,发挥学生的主动性,锻炼学生的实验动手能力和探究能力;实验表征及分析主要是使用大型实验仪器,实现理论与实践的结合,培养学生的科学创新思维,通过整理实验数据及相关软件应用,锻炼学生数据处理、归纳分析及表达的能力,提升综合素养。

2 实验教学内容

2.1 样品制备

采用电弧熔炼法制备 $\text{Sm}_2(\text{Co}_{0.87}\text{Fe}_{0.09}\text{Ti}_{0.04})_{17}$ 合金,其中所用 Sm、Co、Fe 和 Ti 金属的纯度为 99.95%,该过程是在高纯氩氛围的熔化室中进行的。为了得到成分均匀的钢锭,合金原材料被熔化了三次。此外,还多添加了 10% 质量的 Sm,以弥补电弧熔炼过程中因 Sm 的挥发而造成的损耗。随后,使用研钵和研杵将铸锭破碎成更小的碎片。纳米薄片是用表面活性剂辅助高能球磨

(SABM)技术得到,球磨时粉末与球的质量比例为 1:35,其中球的直径为 5mm。以油酸为表面活性剂,有机溶剂庚烷(98.5%)为研磨介质,它们的重量分别为初始 SmCo 粉的 15% 和 300%。研磨后,将浆料收集起来并用乙醇洗涤三次,以去除油酸,获得样品粉末(纳米片)。将球磨后的纳米片与环氧树脂混合并将混合物置于 5kOe 静态磁场中直到环氧树脂凝固以制备取向纳米片样品。

2.2 结构和性能表征

在室温下使用 X 射线衍射仪(X-ray diffraction, XRD, Smart Lab-Se)(Cu $K\alpha$)研究粉末的物相组成;通过场发射扫描电子显微镜(Scanning Electron Microscope, SEM, Gemini SEM 300)分析纳米片的形貌和结构;通过最大磁场为 1.5T 的振动样品磁强计(Vibrating Sample Magnetometer, JDM-13)测量纳米薄片的室温磁性能,用超量子干涉器件(SQUID)磁力计测量样品的低温磁性能。

2.3 典型实验结果与讨论

2.3.1 相组成分析

图 1 给出了未经过球磨和球磨 4h 的 $\text{Sm}_2(\text{Co}_{0.87}\text{Fe}_{0.09}\text{Ti}_{0.04})_{17}$ 纳米磁粉(薄片)的 XRD 谱图,其中的所有衍射峰都属于六边形 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 相(PDF # 26-0484),未检测到氧化物的存在。研磨后衍射峰的宽度变大,表明晶粒尺寸变小,结晶度降低,非晶相数量逐渐增加,球磨过程没有产生新的结晶相成分。通过 Scherrer 公式^[6],由 XRD 数据计算出平均晶粒尺寸分别为 27nm 和 9nm。

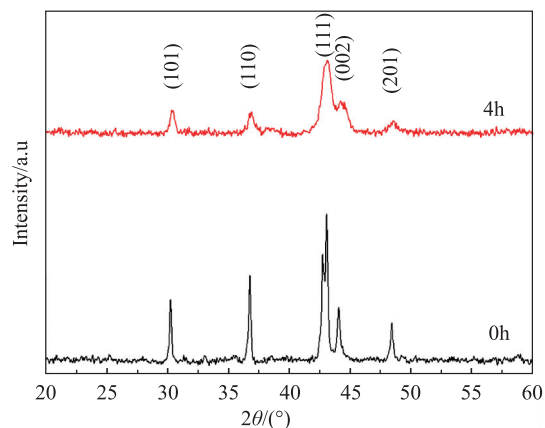


图 1 未球磨和球磨 4 小时的纳米磁粉(薄片)的 XRD 谱图

2.3.2 形貌分析

图 2 给出了未经研磨和研磨了 4h 磁性粉末

的 SEM 照片。可以看出,起始粉末(图 2(a))表现为明显的不均匀、大小和形状不规则颗粒的团聚体,厚度约为 $2.000 \sim 5.000 \mu\text{m}$ 。球磨 4h 后的纳米薄片(图 2(b)),显示出均匀的形貌,厚度约为 30nm,平均长度和宽度分别为 523nm 和 240nm。在球磨的作用下,不均匀的合金粉会分解并转变为均匀形状的纳米薄片,球磨 4 小时后,诱导出逐层堆积的“烤肉串状”形态,这归因于纳米薄片之间的静磁相互作用。此外,纳米薄片厚度的减小有助于获得更大的表面积与体积比,从而增强了硬磁性相之间的耦合。

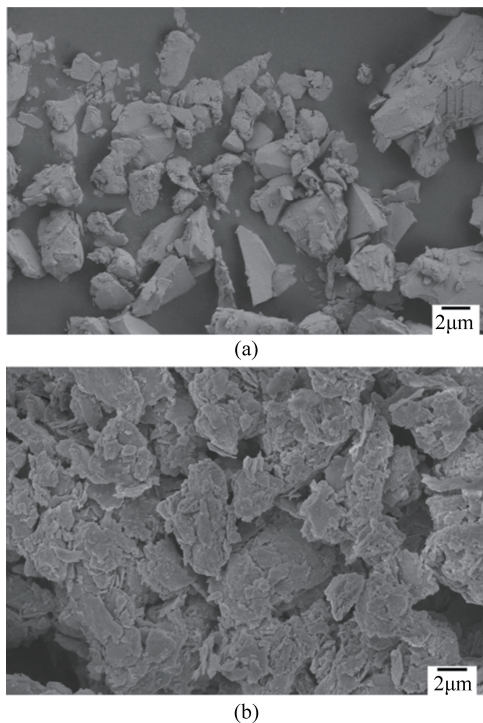


图 2 球磨 0(a)和 4h(b)的纳米磁粉(薄片)的 SEM 照片

2.3.3 磁性能分析

图 3 给出了球磨 0 和 4h 的磁性粉末的磁滞回线。球磨 4h 后,饱和磁化强度由 85 降低到了 74 emu/g ,剩磁由 18 增加到了 44 emu/g ,矫顽力从没球磨样品的 0.75 kOe 增加到球磨 4 小时的 5.00 kOe ,此变化来源于球磨对磁性晶粒的细化作用,以及长时间球磨使得非晶相的形成量增加。非晶相磁性能较弱,其含量的增加使得粉末的总饱和磁化强度降低;而颗粒尺寸的降低可以提高粉末颗粒的各向异性,从而提高纳米永磁材料的矫顽力。

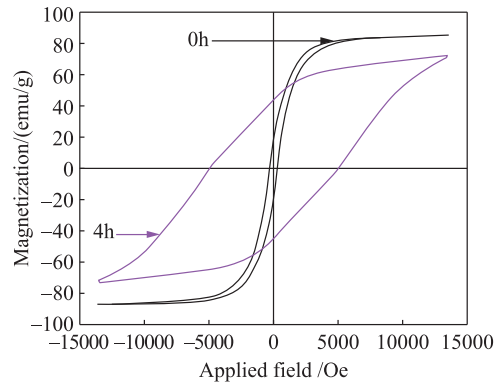


图 3 球磨 0 和 4h 的纳米磁粉(薄片)微粉的磁滞回线

2.3.4 交换相互作用表征及分析

鼓励学生对磁性能变化原因的分析 and 探究,以增加实验项目的“高阶性”和“挑战度”。图 4 给出球磨 4h 所得取向和未取向纳米片的退磁曲线。未取向纳米片的矫顽力值(H_c)为 5.0 kOe ,剩磁比(M_r/M_s)为 0.59。根据 Stoner Wohlfarth 理论,对于无相互作用的随机取向的磁性粒子集团,剩磁比为 0.5。我们所得样品中,剩磁比为 0.59,表明纳米片中存在弱的交换相互作用^[7]。而对于取向纳米薄片, H_c 和 M_r/M_s 分别为 4.8 kOe 和 0.81。取向纳米片中 M_r/M_s 的显著增强可能来自磁取向纳米片中强烈的晶间交换相互作用^[8]。

为了分析磁性颗粒之间的交换耦合效应,采用了一种常用的 Henkel 曲线方法,用 Δm 表示, $\Delta m = (M_d(H) + 2M_r(H))/M_r(\text{max}) - 1$ ^[9],其中 $M_r(H)$ 为外加正场(+H)后的退磁剩磁, $M_d(H)$ 为反向场(-H)退磁后的剩磁, H 为外加磁场。对于非相互作用晶粒集体有 $\Delta m = 0$,而非零的 Δm 表明晶粒之间存在相互作用。一般来说, Δm 的正值表示交换耦合作用占主导地位;而

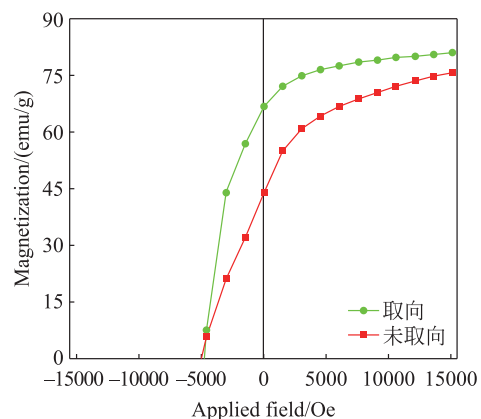


图 4 球磨 4h 所得磁粉的磁取向和未取向纳米片的退磁曲线

Δm 为负值,表明偶极相互作用占主导地位(静磁相互作用)。图 5 给出了球磨 4h 后取向和未取向样品的 Henkel 曲线。可见对于磁取向的纳米片, Δm 有较大的正值,说明晶间交换耦合较强。相反,未取向纳米片的 Δm 值最初为小的正值,表明交换耦合较弱,随着反向场的增加, Δm 获得更大的负值,这意味着偶极子相互作用占主导地位。

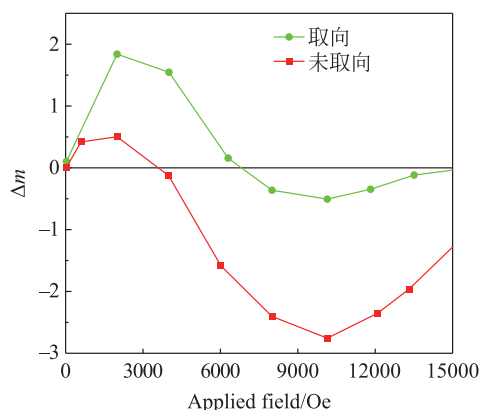


图 5 球磨 4h 所得磁粉取向和未取向样品的 Henkel 曲线

2.3.5 矫顽力机理分析

引导学生对磁性材料矫顽力机理的分析和研究,体现实验项目的“挑战度”。纳米永磁材料的矫顽力机制可以用 Fischer 等人提出的微磁学模型来考查^[10],其表达式为 $\mu_0 H_c = 2\alpha_K \alpha_\varphi \mu_0 k_1 / J_s - N_{\text{eff}} J_s$,其中 k_1 为一阶磁晶各向异性常数, $J_s = \mu_0 M_s$ 为饱和磁化强度, $\alpha_K \alpha_\varphi$ 和 N_{eff} 分别为微观结构系数。当晶界错位位置处退磁场较大($\alpha_K \alpha_\varphi$ 较小)时,磁化反转的启动主要发生在位于晶界的错位晶粒中,矫顽力主要由成核场决定。图 6(a)显示了研磨 4h 后磁粉的磁滞回线随温度的变化,随着温度的降低矫顽力一致降低,主要来源于磁晶各向异性常数随温度的降低而增大。微观结构系数可以由图 6(b)所示的 $\mu_0 H_c / J_s$ 和 $2\mu_0 k_1 / J_s^2$ 之间的关系曲线得到。 $\alpha_K \alpha_\varphi$ 和 N_{eff} 的值分别为 0.13 和 -0.08。 $\alpha_K \alpha_\varphi$ 小于 0.3,表明反磁化畴的成核和畴壁运动的钉扎同时控制着磁化反转过程^[11]。

3 教学组织与实施

本综合创新实验包含物理、材料、化学等多门交叉学科的基本理论与技术,所涉及的磁性材料方向是我校新工科应用物理专业的主要方向,需

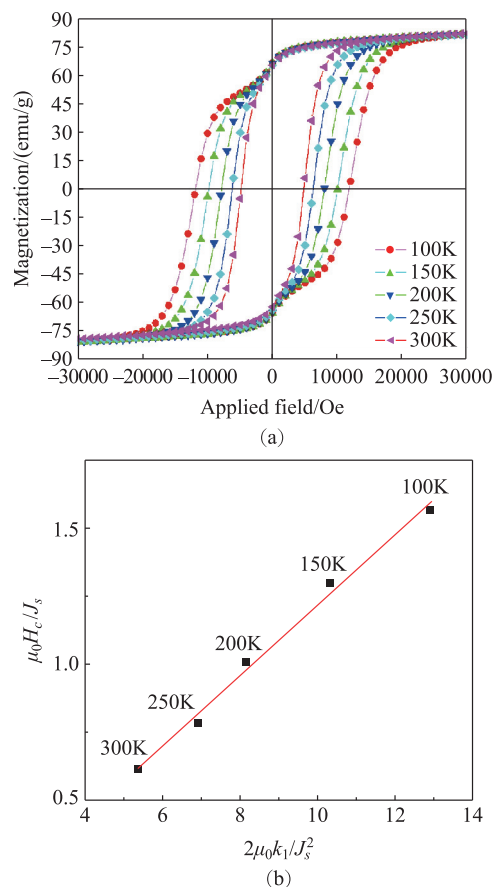


图 6 研磨 4h 磁粉的(a)磁滞回线随温度的变化,以及(b) $\mu_0 H_c / J_s$ 和 $2\mu_0 k_1 / J_s^2$ 之间的关系曲线

磁学方向学生要掌握的内容,包括材料制备和表征的新方法、新技术,因此将该创新实验编进“新工科创新实验”课程中。

该综合实验步骤较多、耗时较长,需要团队分组合作完成,每个小组 2~3 人。该实验安排 32 个课时,分 8 次完成,每次课 4 个课时。第 1 次课,为学生介绍磁性材料及发展历程,着重介绍 $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ 基磁性粉末材料的结构和性能,并讲解有关实验原理、实验流程、实验安全和操作注意事项,并安排学生课后调研文献、确定样品配方;第 2~3 次课时,安排学生根据配方称量原材料,并熟悉和练习电弧炉的使用方法和注意事项,制备合金钢锭;第 4 次课安排学生熟悉和练习球磨机的使用方法和注意事项,介绍表面活性剂种类及添加量对微结构和磁性能的影响规律,制备磁性粉末;第 5~6 次课,制备取向样品,并介绍 XRD 和 SEM 测量原理,对样品进行相成分和微结构测量,分析球磨时间对他们的影响;第 7~8 次课,介绍 VSM

和 SQUID 的基本原理,完成磁性能的测量及分析。

实验结束后,学生需自主完成实验报告:利用 Origin 软件处理数据、绘制相关曲线图,分析球磨时间对磁性粉末微结构和磁性能的影响规律,并完成结课汇报,可较好体现实验课程的“高阶性、创新性、挑战度”。

4 实验教学效果

本综合创新实验充分利用科研实验室设备条件,以磁性材料制备和表征为基础,帮助学生掌握电弧熔炼技术和球磨法制备稀土永磁粉末的基本方法和步骤,增强对材料性能测试与表征的设备、手段的认知。同时帮助学生初步建立开展交叉前沿领域科学研究的基本方法,理解科学与技术之间相互制约关系。学生在实验教学过程中通过阅读文献,完成实验设计和操作,培养了查阅文献与动手实践的能力;对所得样品进行结构分析与性能测试,培养了学生的仪器操作基本技能和自主探索精神,提升了学生的科研思维。

5 结语

随着国家对创新型人才需求的增加,将科研成果融入综合实验设计,推动学生早接触、早实验、早创造,可以提高学生科研兴趣,开发学生科研能力,开拓学生自主创新意识和动手实践能力。该创新实验涉及材料合成、表征以及磁性能测量及机理分析,将常用的表征技术和测试手段引入其中,在学习磁性材料相关知识的同时,让学生了解真空电弧熔炼、高能球磨等技术原理,内容丰富,综合设计性强,很好体现课程的“高阶性、创新性、挑战度”。作为山东大学新工科应用物理专业“新工科创新实验”的一个项目,经过两年的实践,很好锻炼了学生自主解决问题的能力,并促进师生的双向互动,实现教学相长,教学效果良好。

参 考 文 献

[1] 黄凯. 原子力显微镜的研究型教学实验设计探讨[J]. 大学物理实验, 2014, 27(4): 24-27.

- HUANG K. Discussion on the Research Teaching Experiments of Atomic Force Microscopy[J]. Physical Experiment of College, 2014, 27(4): 24-27. (in Chinese)
- [2] 黄凯, 廖卫华, 徐雯雯, 等. 石墨烯/钕铁氧体复合材料的制备及微波吸收性能的综合实验设计[J]. 大学物理实验, 2024, 37(1): 41-44.
- HUANG K, LIAO W H, XU W W, et al. Comprehensive Experimental Design for the Preparation and Microwave Absorption Properties of Graphene/Barium Ferrite Composites[J]. Physical Experiment of College, 2024, 37(1): 41-44. (in Chinese)
- [3] 张刚, 葛强, 王辉升, 等. 基于光纤温度和应变传感器的物理创新实验[J]. 大学物理, 2023, 42(4): 21-27.
- ZHANG G, GE Q, WANG H S, et al. Innovative physics experiment based on fiber optic temperature and strain sensor[J]. College Physics, 2023, 42(4): 21-27. (in Chinese)
- [4] HAN GB, WANG K, ELKINS K, et al. Cold plasma reduction of surface carbon on SmCo_5 nano-flakes prepared by surfactant-assisted ball-milling[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2019, 471: 250-254.
- [5] RAZA S, ALAM MK, HAN GB, et al. Strong textured $\text{Sm}_2(\text{CoFeTi})_{17}$ nano-flakes prepared by surfactant-assisted ball milling[J]. Indian Journal of Physics, 2024, 98(8): 2829-2836.
- [6] FERNENGEL W, LEHNERT A, KATTER M, et al. Examination of the degree of alignment in sintered Nd-Fe-B magnets by measurements of the remanent polarizations[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 1996, 157-158: 19-20.
- [7] RONG C B, Nguyen V, LIU J P. Anisotropic nanostructured magnets by magnetic-field assisted processing[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107: 1-4.
- [8] LIU S, RAY A E. $\text{Sm}_2(\text{Co, Fe, Cu, Zr})_{17}$ magnets with higher Fe content[C]. Magnetics Conference, 1989. Digests of INTERMAG '89. International. IEEE, 1989.
- [9] YANG J, ZHANG D, ZHU R, et al. Effect of $(\text{Sm, Pr})_2\text{Co}_7$ phase on magnetic properties of high-performance $(\text{Sm, Pr})\text{Co}_5$ magnet based on EBSD analysis and magnetic domain observation[J]. Materials Characterization, 2021, 181: 111478.
- [10] CHANG H, CHANG W, LEE M, et al. Magnetic properties and Mössbauer studies of Pr-Fe-B-type nanocomposites[J]. Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 2002, 239: 461-463.
- [11] ZUO W L, ZHAO X, ZHAN T Y, et al. Ultrathin SmCo_5 nanoflakes with high-coercivity prepared by solid particle (NaCl) and surfactant co-assisted ball milling[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 1-6.